

VERSIONAMIENTO 2009-2010 DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN, Y EL MODELO HIDROGEOLÓGICO MATEMÁTICO DE VILLAVICENCIO PARA UN ÁREA DE 30.000 HA, UTILIZANDO HERRAMIENTAS GIS Y VISUAL-MODFLOW - "ANÁLISIS 3D"

Jesús Leal

Ingeniero Ambiental, Especialista en Geomática,
Universidad Militar Nueva Granada., Bogotá, Colombia
jesus_leal14@hotmail.com

Adriana Cárdenas Quiroga

Geóloga, Msc, Profesora Asistente, Facultad de Ingeniería, Líder Grupo Geomática Aplicada,
Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
ingenieria.geomatica@unimilitar.edu.co

RESUMEN

Las bases de datos geoespaciales utilizando ArcSDE permiten administrar la información geográfica en un sistema multiusuario, proporcionando una interfaz abierta a los sistemas de administración de bases de datos relacionales, las cuales permiten a la herramienta ArcGIS manipular la información geográfica brindando la optimización necesaria para el análisis de la información, concurrencia de los usuarios y manejo de versiones con el fin de ejecutar cambios que son realizados sobre los elementos de un nivel geoespacial a través del tiempo.

De esta forma se pueden duplicar datos mediante una versión, utilizando la herramienta Database Server para generar un modelo hidrogeológico que muestre el cálculo de la Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, empleando como insumo un modelo digital de elevación, planchas topográficas, geología regional, datos de recarga de los acuíferos para los años 2009 y 2010, profundidad del nivel freático entre otros, obteniendo cómo resultado dos modelos para cada una de las versiones. Los valores de recarga para cada año fueron requeridos para el cálculo de la Vulnerabilidad intrínseca y para generar la recarga del modelo matemático hidrogeológico ejecutado en Visual ModFlow, con el fin de obtener a partir de herramientas de Geoprocesamiento en ArcGis 10.0 y ArcScene un modelo 3D de la Vulnerabilidad, Geología e Hidrogeología del municipio de Villavicencio en un área de 30.000 Ha.

Palabras clave: Bases de datos, Versionamiento, Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, Hidrogeología, ArcScene, SIG.

ABSTRACT: The geospatial database using ArcSDE allow you to manage geographic information on a multiuser system, providing an open interface management systems relational databases, which allow the tool to manipulate ArcGIS geographic information necessary to provide optimization for analysis information, concurrent users and management of versions in order to execute shifts which are performed on the elements of a geospatial level over time.

This data can be duplicated by a version, using the Database Server to generate a hydrogeological model that shows the calculation of the intrinsic vulnerability to contamination, using as input digital elevation model, topographic sheets, regional geology data recharge for the years 2009 and 2010, resulting in two models for each of the versions. Recharge values were required for each year to calculate the intrinsic vulnerability and to generate the mathematical model recharge Visual Modflow hydrogeological executed in order to obtain from GeoProcessing tools in ArcGis ArcScene 10.0 and a 3D model of Vulnerability, Geology and Hydrogeology of the municipality of Villavicencio in an area of 30,000 hectares.

Keywords. Databases, Versioning, Intrinsic Vulnerability To Contamination, Hydrogeology, Arcscene, GIS

INTRODUCCIÓN

El versionamiento utilizando ArcSDE y ArcScene como herramientas para crear y facilitar el análisis visual en 3D y multitemporal, permite obtener un orden de trabajo que tenga en cuenta procesos básicos de geoprocetamiento y manipulación de herramientas espaciales. De acuerdo a lo anterior este trabajo permite establecer un enfoque de cómo se pueden manejar diferentes versiones en una sola base de datos, con el fin de generar de manera simultánea la posibilidad de ser editada por uno o varios usuarios al mismo tiempo, obteniendo resultados con mejor calidad posicional, georreferenciados y agradables visualmente al usuario final.

Este tipo de herramientas SIG (ArcSDE y Arcscene) son las indicadas para recopilar, estructurar y presentar resultados sobre proyectos con un enfoque hidrogeológico, en especial identificar la diferencia entre fechas con diferentes tipos de vulnerabilidad intrínseca para cada tipo de recarga y el flujo del agua subterránea a través de las capas geológicas utilizando una interfaz 3D. En este caso se realizó un modelo matemático hidrogeológico no transitorio utilizando el software Visual ModFlow 2011.1 como herramienta para obtener como resultado el flujo del agua subterránea para dos tipos de recarga; de esta forma se pueden extraer las líneas de flujo en formato vector para la Versión 2009 y 2010 del modelo construido en ArcScene.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Para elaborar el modelo 3D se realizaron varios tipos de Geoprocetamiento, entre los cuales están generar la cartografía digital, delimitar el DEM para el área de estudio, construir y georreferenciar coordenadas X, Y, y Z de los cortes geológicos, procesar las líneas de flujo obtenidas a partir del modelo matemático de aguas subterráneas y calcular la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos representada de forma espacial, utilizando la metodología GOD.

También se ejecutó una recopilación de la información hidrogeológica en la Corporación Autónoma Regional – CORMACARENA del municipio de Villavicencio Departamento del Meta, en la cual se pudo obtener la información para el año 2009

relacionada con la recarga de los acuíferos y el nivel freático para los pozos y aljibes; adicionalmente se utilizó la información en el Servicio Geológico Colombiano IGEO MINAS del cual se obtuvo la cartografía Geológica, las estructuras geológicas, los contactos, la profundidad y las características de cada formación.

1.1 CARTOGRAFÍA UTILIZADA y MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM).

Para elaborar del modelo en 3D, se tomó como base topográfica dos planchas escaneadas en alta resolución para un área geográfica de 30.000 Ha en el Municipio de Villavicencio - Departamento del Meta (Ver figura 1), estas planchas fueron digitalizadas teniendo en cuenta el catálogo de objetos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (vías, catastro, transporte, hidrografía); también fueron digitalizadas las unidades estratigráficas y fallas con el fin de construir una geodatabase para crear el mapa geológico y poder exportar los elementos a la base de datos SQLEXPRESS. Las planchas topográficas que fueron utilizadas se encuentran a una escala de 1:25.000 del IGAC identificadas por las hojas cartográficas 266-II-B y 266-II-D elaboradas en 1983 sin actualización alguna.

Con el fin de generar las superficies de elevaciones para el modelo 3D se utilizó el DEM de Colombia con una resolución por pixel de 30 m X 30 m del cual fueron obtenidas las curvas de nivel; el DEM fue ajustado a la zona de estudio (30.000 Ha) y es la herramienta utilizada para generar la base de alturas, personalizar todos los elementos vector de la topografía, y los elementos polígono de la geología digitalizados a cada superficie 3D del mapa.

1.2. MODELO HIDROGEOLÓGICO MATEMÁTICO.

Para construir el modelo matemático se elaboraron cuatro (4) cortes geológicos de Este a Oeste distribuidos a lo largo de la zona de estudio, estos cortes fueron contruidos con información base y un análisis minucioso del tipo de estructuras presentes en el área de estudio. Estos cortes fueron digitalizados con el fin de obtener un modelo de superficies para cada formación geológica. El modelo de superficie es exportado al software Visual Modflow 2011.1 para crear y representar de forma matemática la estructura de los acuíferos presentes en la zona, asignando las propiedades geohidráulicas de cada acuífero, la recarga del sistema y por último la red hídrica principal obteniendo como resultado, un modelo matemático bidimensional del cual se pueden extraer y exportar las líneas de flujo presentes en los acuíferos para cada Versión.

1.4. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.

Para calcular la vulnerabilidad de los acuíferos se utilizó el método GOD el cual es usado para estimar la susceptibilidad de la contaminación para los acuíferos cuando no se cuenta con varios datos. Este método establece la vulnerabilidad del acuífero como una función de la inaccesibilidad a la zona saturada desde el punto de vista

hidráulico, así como la inserción de los contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada (Foster e Hirata, 1991).

La metodología GOD se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 utilizando tres variables descritas a continuación: Distancia del agua, es obtenida a partir del inventario de pozos y aljibes realizado en campo (Información base año 2009). Otra variable es la Ocurrencia, la cual define el grado de confinamiento para los acuíferos, ya sea que varíen de no confinado, semiconfinado (Cubierto) y confinado, y por último el Sustrato litológico, el cual se define a través del tipo de unidad litoestratigráfica que compone el acuífero (INEGEOMINAS). Estos tres parámetros se multiplican para obtener una valoración de la vulnerabilidad desde 0 (Muy Baja) hasta 1 (Extrema):

$$GOD = G \times O \times D = 0 - 1 \quad \text{Ec. 1}$$

1.5. METODOLOGÍA.

La presente metodología permite obtener y ajustar los geodatos obtenidos, generar versiones de los elementos a modelar, elaborar el modelo 3D sobre la Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación, modelar la geometría de las unidades hidrogeológicas y disponer de fuentes de información para el modelo de aguas subterráneas con la asistencia de SIG.

1.5.1. Análisis Bibliográfico.

Para obtener el inventario de aguas subterráneas, pruebas de bombeo a pozos profundos y algunas características de los acuíferos y la geología, se realizó un análisis bibliográfico en la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial la Macarena del Departamento del Meta (CORMACARENA), en la cual se obtuvo el estudio elaborado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC sobre “La evaluación Hidrogeológica del Municipio de Villavicencio para el año 2009” del cual se pudieron analizar las siguientes características:

Inventario: Se recopiló información del estudio hidrogeológico con el fin de evaluar datos reales del año 2009 para obtener el valor de los niveles del agua subterránea en cada uno de los puntos inventariados, obteniendo como resultado un total de 40 puntos hidrogeológicos distribuidos de la siguiente forma: 31 aljibes y 9 pozos profundos repartidos en su mayoría entre las Veredas Caños Negros y Apiay. La zona de estudio presentan para el año 2009 una recarga aproximada de 700 mm/año para el cual el nivel de agua subterránea se encuentra entre los 2 m a los 10 m de profundidad.

Al ejecutar el modelamiento de la Vulnerabilidad intrínseca para el año 2010, se decidió aumentar el valor de la recarga de forma arbitraria a aproximadamente 2000 mm/año, presumiendo un cambio drástico en el incremento de los niveles de agua subterránea para la zona, variando la profundidad del agua subterránea entre 0 m a

2 m. Los anteriores valores son diseñados con el fin de observar el cambio de Vulnerabilidad y dirección de flujo entre el modelo Versión 2009 y el modelo Versión 2010.

Geología: Teniendo en cuenta el análisis bibliográfico suministrado por CORMACARENA y el SERVICIO GEOLOGÍCO COLOMBIANO - INGEOMINAS (Plancha 266 Villavicencio), en la zona de estudio afloran las siguientes unidades geológicas:

Rocas Sedimentarias.

- Depósitos Aluviales (Qal).
- Depósitos de Derrubio (Qd).
- Terrazas (Qt).
- Formación la Corneta (TQlc).

- Formación Areniscas del Limbo (Pgarl).
- Formación Arcillas del Limbo (Pgal).
- Grupo Palmichal (KPgp).
- Formación Chipaque (Ksc).
- Formación Une (Kiu).
- Formación Fómeque (Kif).
- Formación Arenisca de Cáqueza (Kic).
- Formación Lutitas de Macanal (Kilm).
- Formación Brechas de Buenavista (Jsb).

Grupo Farallones.

- Formación Capas rojas del Guatiquía (Pcgc).
- Lutitas de Pipiral (Pdp).

Grupo Quetame

- Filitas y cuarcitas de Guayabetal (PCAqgu).

Geología Estructural: Algunas de las fallas que se utilizaron para el modelo matemático y el modelo 3D son la Falla Villavicencio, la Falla Colepato y la Falla Bavaria.

De esta forma se obtienen algunas de las variables a utilizar en el modelo matemático hidrogeológico y en el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos para los años 2009 y 2010.

1.5.2. Digitalización.

A partir de las dos (2) hojas cartográficas 266-II-B y 266-II-D a escala 1:25000 se realizó la cartografía base a escala 1:50000 del área de estudio, teniendo en cuenta procesos de evaluación para los diferentes métodos de captura de la información espacial aplicando varias reglas de validación topológica sobre la información. Al realizar el proceso de digitalización se identificaron elementos topográficos concernientes a la escala final del mapa, cumpliendo con los umbrales de exactitud y precisión en posición de acuerdo con la resolución 64 de 1994 del ICONTEC. La zona de estudio está georreferenciada de acuerdo al Datum MAGNA SIRGAS con origen en Bogotá (Elipsoide GRS 80).

Al obtener la topografía en formato shp digitalizada en la herramienta ArcGis 10.0, se realizó el mapa geológico a partir de la información secundaria utilizando una geometría tipo polígono para cada una de las Unidades, Fallas y Contactos. Los anteriores procesos son administrados de manera adecuada en cada uno de los niveles de información geoespacial creados (Geodatabase, FeatureClass, tipos, Subtipos y Dominios), con el fin ser manipulados de una manera eficiente en la Base de datos.

1.5.3. Modelo matemático.

Para ejecutar la estructura del modelo matemático en estado estacionario se toma como base un modelo hidrogeológico conceptual de la zona establecido previamente, donde se instauran las propiedades hidráulicas de los acuíferos obtenidas de la información secundaria como Conductividad hidráulica, Coeficiente de almacenamiento y porosidad de los acuíferos los cuales funcionan como variables de entrada en el modelo matemático generado en Visual ModFlow 2011.1.

Al construir el modelo matemático se utilizó una configuración estructural de los acuíferos ubicados en la zona de estudio, elaborando 4 cortes geológicos distribuidos de forma equitativa sobre el mapa geológico. Los cortes geológicos son convertidos a puntos y estos puntos son georreferenciados creando un archivo xyz.txt para cada corte; estos archivos xyz.txt, son los datos de entrada al modelo matemático con el fin de obtener la profundidad, ubicación del tope y la base para cada acuífero. Al obtener la estructura del modelo se pueden adicionar las propiedades geohidráulicas (Conductividad hidráulica, porosidad y coeficiente de almacenamiento) y la hidrología superficial.

En la siguiente figura se observan los 4 cortes geológicos y su distribución espacial tanto en vista transversal como vista en planta.

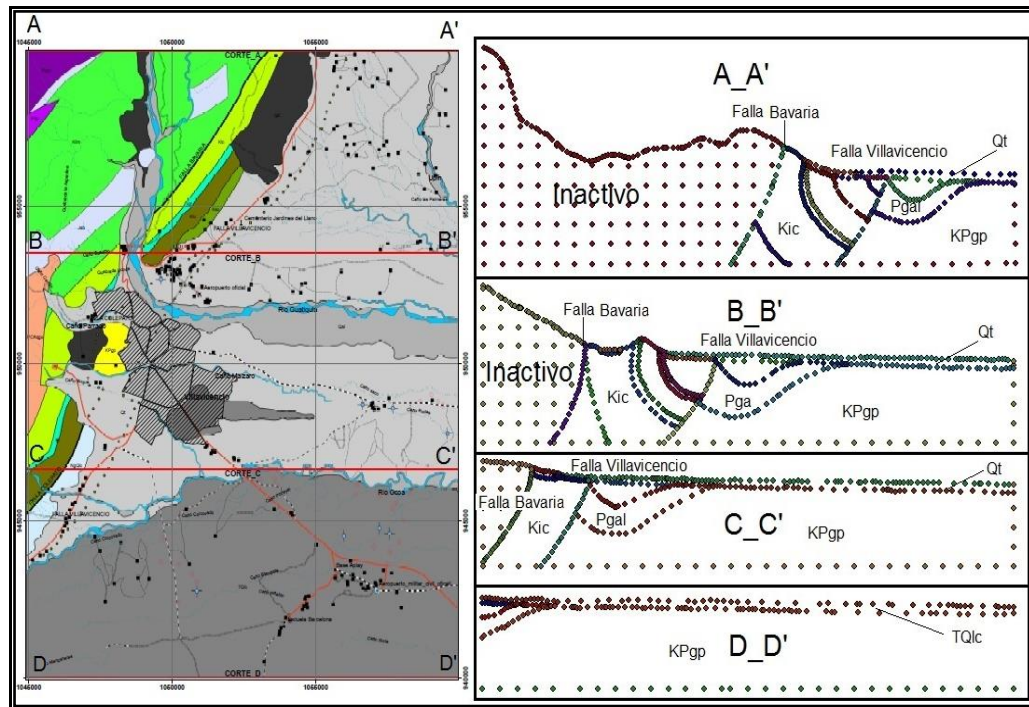


Figura 1. Distribución de los cortes geológicos.

Fuente: Fuente propia.

Al construir el modelo se definió una grilla de 100 filas x 100 columnas, de las cuales se desactivaron varias zonas de alta complejidad geológica con el fin de evitar que el estudio tome otro enfoque, las zonas inactivadas se encuentran al Oeste de la Falla Bavaria y Colepato como se observa en la figura 2.

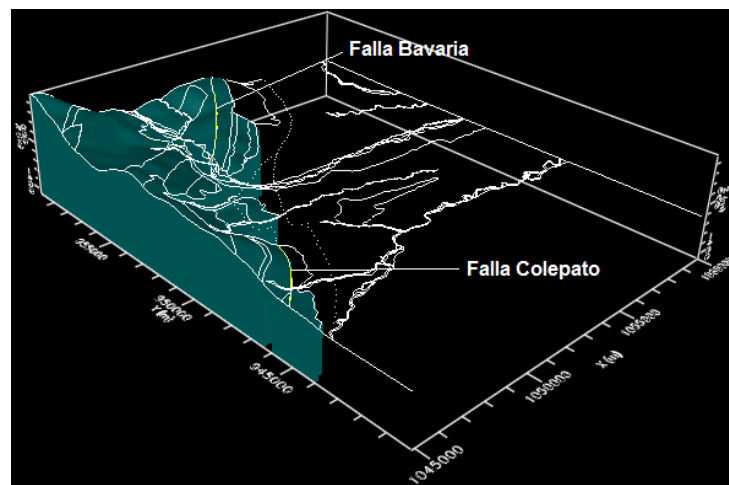


Figura 2. Ubicación de las zonas inactivas del modelo. Visual Modflow.

Fuente: Fuente propia.

Conductividad Hidráulica. Es una de las variables de entrada más importantes para ejecutar el modelo matemático, son los valores de conductividad hidráulica los cuales pueden definir el comportamiento para cada acuífero. En la figura 3 se puede

observar la distribución de las conductividades por cada acuífero definidas de acuerdo a las pruebas de bombeo obtenidas de la información base, y el tipo de formación geológica que le pertenece a cada corte.

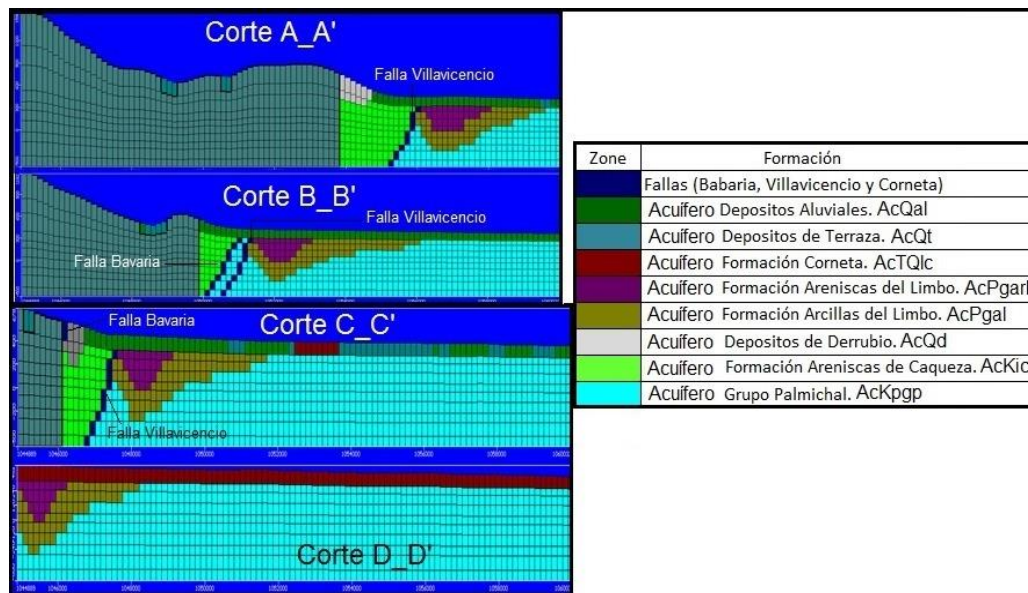


Figura 3. Distribución de los acuíferos de acuerdo a la conductividad hidráulica.

Fuente: Fuente propia.

Los ríos que hicieron parte en la ejecución del modelo matemático del sistema son los ríos Guatiquia, Río Ocoa y el Río Upin.

Resultados de la simulación Numérica.

Una vez discretizado el modelo se procedió a la “corrida” del mismo en estado estacionario o condiciones iniciales de flujo; para esto se empleó el método de matrices que emplea MODFLOW para la solución del problema. En la figura 4 se encuentran las dos versiones (2009 y 2010), las cuales indican como aumentan las zonas secas cuando existe una recarga de 700 mm/año en comparación con el año 2010 para la cual hay una recarga de 2000 mm/año. También se puede observar que las zonas de piedemonte permanecen secas debido a la pendiente, factores estructurales y tipo de roca impermeable de la zona.

El flujo del agua subterránea se comporta casi de la misma forma y dirección para las dos versiones, observando en la figura 4 que hay un cambio entre la V_2009 y la V_2010, en la cual el gradiente hidráulico (Cabeza constante) del Río Ocoa y Río Guatiquia aumenta de la misma forma que la precipitación, generando mayor movimiento y aumento en el número de vectores que representan el flujo agua subterránea.

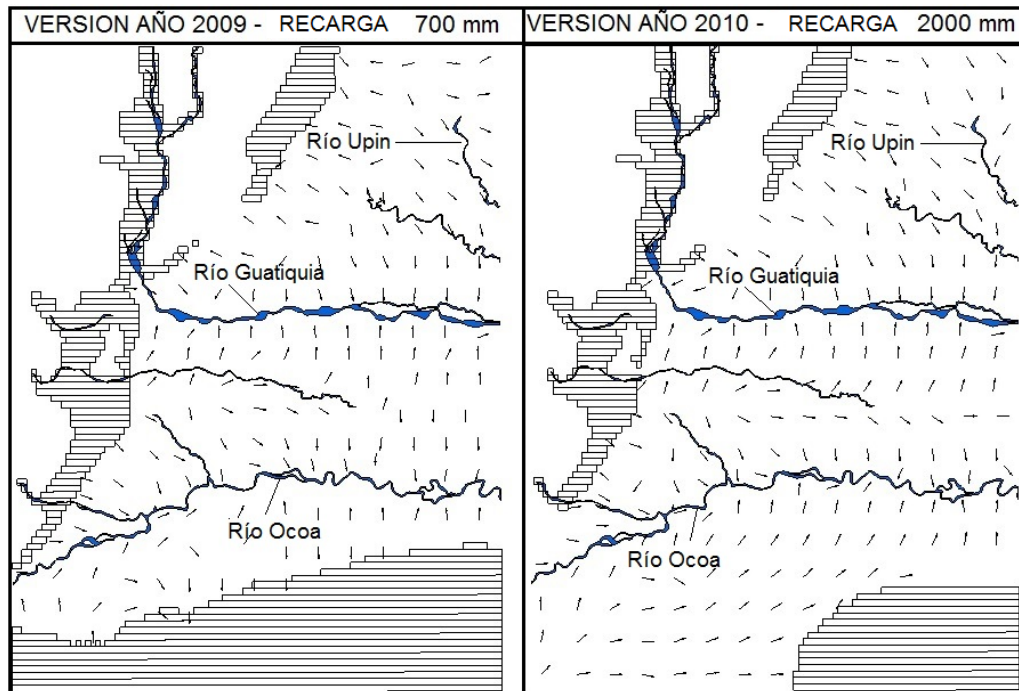


Figura 4. Dirección del flujo del agua subterránea (Nivel freático).

Fuente: Fuente propia.

Los vectores para cada una de las versiones (2009-2010), son exportados a shp y administrados en la base de datos SQLEXPRESS.gds con el fin de ser versionados.

1.5.4. Database servers.

ArcSDE ubicado en ArcCatalogo permite administrar la información en formato shp digitalizada la cual es administrada en Data Server y a partir de una nueva Geodatabase originada, son administrados todos lo Feature Dataset los cuales contienen la información relacionada con la topografía, Vulnerabilidad, dirección de flujo y geología (línea, polígono, punto). Al importar cada uno de los niveles de información espacial a los Feature Dataset se procede a realizar el registro de versionamiento, el cual genera de forma automática una versión temporal (DEFAULT) que se encuentra dispuesta a ser modificada por otros usuarios al mismo tiempo.

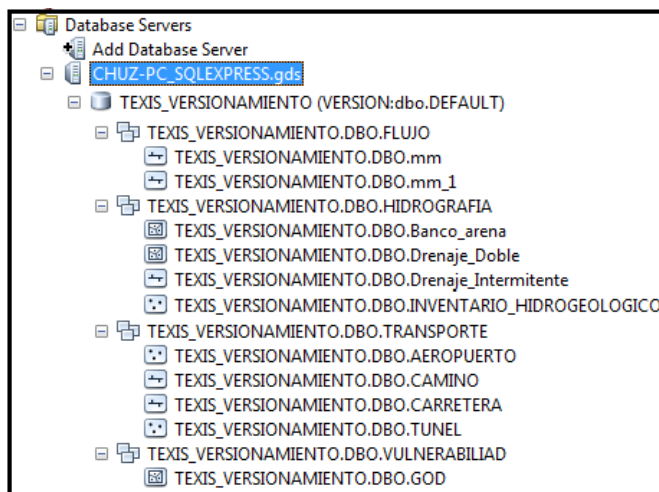


Figura 5. Versionamiento Database Server, SQLEXPRESS.

Fuente: Fuente propia.

Al registrar el versionamiento de los datos representados en la figura 5, estos son adicionados a ArcScene, con el fin de crear a partir de la herramienta “Versioning” dos nuevas versiones llamadas V_2009 y V_2010 de carácter público, las cuales son utilizadas para editar y soportar la información generada para la Vulnerabilidad y las direcciones de flujo (Nivel Freático y subsuperficial) del agua subterránea para los dos años. De esta forma cada uno de los elementos que son adicionados a la base de datos y sean posteriormente registrados como versionados, puede ser editados de forma simultánea por cualquier usuario que esté conectado a la base de datos SQLEXPRESS.

1.5.5. ArcScene

Para ejecutar el modelo en ArcScene del área de estudio se obtuvo el DEM en formato raster, el cual se transformó a formato tipo TIN como espacio geográfico en un conjunto de triángulos que representan de una mejor forma las elevaciones. Al añadir el DEM en formato TIN, se deben adicionar como base de alturas (Base heights) cada uno de los elementos que conforman parte del modelo (Topografía, Geología, Red de flujo subterráneo e inventario de pozos y aljibes), ajustando las dos versiones a la figura Bidimensional (2.5 D) generada a partir del DEM (Figura 6 - A). De la misma forma se adicionan las profundidades y las áreas de los cuatro (4) cortes geológicos en formato TIN, con el fin transformar el modelo bidimensional (2.5 D) a un modelo tridimensional (3D), ajustando a la superficie las profundidades para cada unidad geológica y el tipo de flujo subterráneo entre los 1700 m.s.n.m a una profundidad negativa de – 500 m para el modelo.

Hay que tener en cuenta que aspectos de la topografía y el inventario de aguas subterráneas continúan fijos para las dos Versiones, ya que estos elementos no cambian a través del tiempo, pero elementos como las redes de flujo son diferentes de acuerdo a los resultados del modelo matemático.

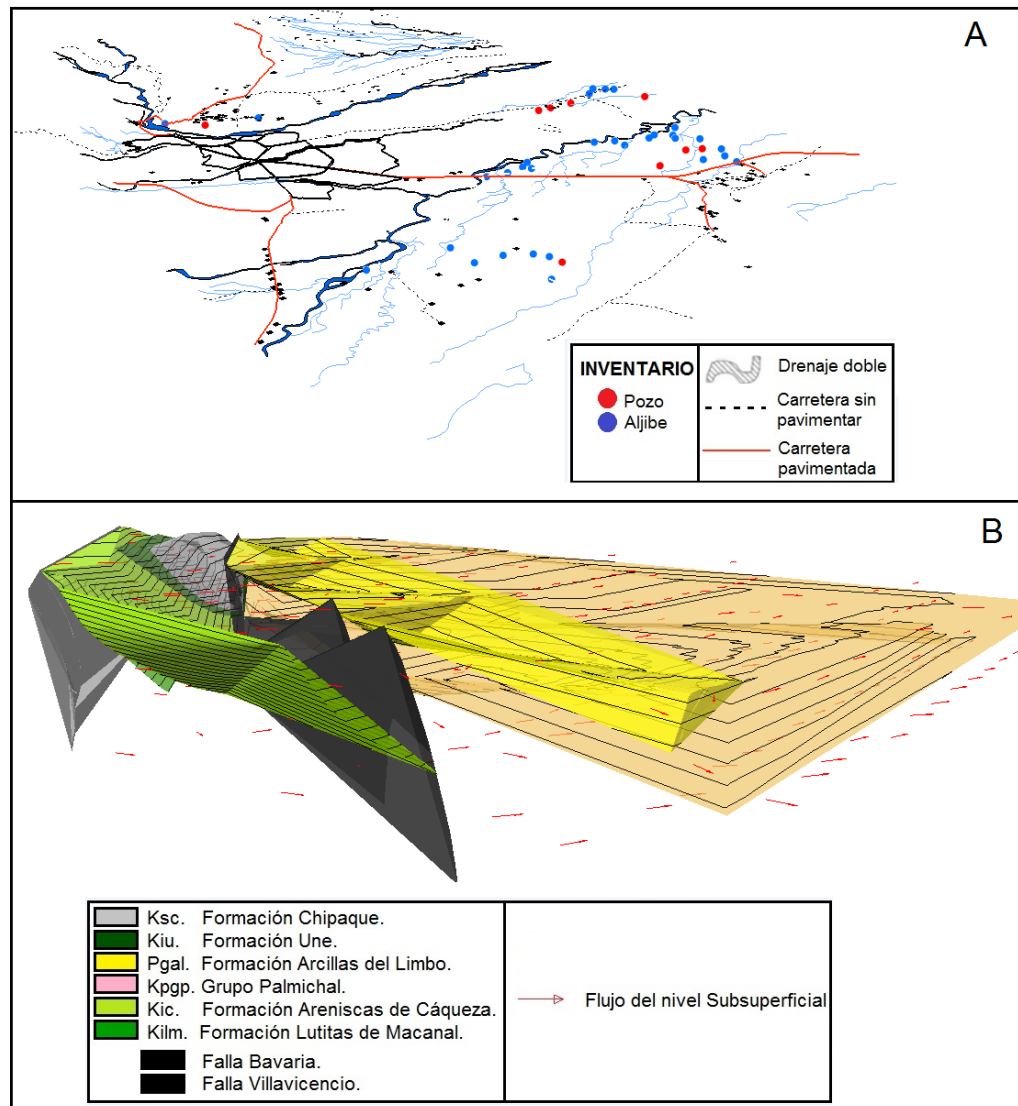


Figura 6. A. Modelo Topográfico e inventario de aguas subterráneas. B. Modelo Geológico subterráneo y Flujo subsuperficial del agua.

Fuente: Fuente propia.

En la figura 6 – B se observa de forma detallada el comportamiento del agua subterránea a través de las fallas (Falla Bavaria y Falla Villavicencio) y de cada una de las formaciones geológicas ya sea en la zona montañosa, de piedemonte o en la parte plana. Las unidades geológicas que afloran en la zona de estudio se convierten en valores de Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, calculando los parámetros referentes al GOD expuestos a continuación.

1.5.6. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación “Metodología GOD”.

Teniendo en cuenta la geología del área de estudio, el inventario recopilado en la información base y el tipo de ocurrencia o tipo de acuífero presente, se calculó para el modelo 3D en cada una de sus Versiones 2009 y 2010 la Vulnerabilidad intrínseca

a la contaminación, la cual es de gran utilidad para generar medidas de control sobre actividades que contaminen los acuíferos superficiales.

Cálculo de vulnerabilidad Intrínseca para la Versión 2009.

En la Versión 2009 se utilizaron los datos de precipitación, recarga, tipos de acuífero y los niveles de agua subterránea medidos por medio de un inventario de pozos y aljibes realizado en campo para la zona de estudio. También se utilizó el tipo de Geología descrito en el estudio hidrogeológico y las memorias de la Plancha 266 del INGEOMINAS.

A continuación se muestra el valor de cada una de las variables que conforman la metodología GOD y su posterior resultado, indicando el tipo de Vulnerabilidad para la Versión 2009 de cada uno de los acuíferos presentes en la zona de estudio.

Parámetro G (Ocurrencia del agua subterránea). Como se mencionó anteriormente este parámetro corresponde al tipo de acuífero estudiado, variando desde no confinado hasta semiconfinado, siendo más vulnerables aquellos acuíferos no confinados.

En la recopilación bibliográfica se encontró el estado mecánico de cinco (5) pozos varios pozos con su respectivo perfil estratigráfico y varios registros de pozo, los cuales ayudaron a definir el tipo de ocurrencia de los acuíferos ubicados en la zona plana y de piedemonte (Ver tabla 1).

Parámetro O (substrato). Este parámetro está asociado al grado de consolidación, a las características texturales de la roca y/o sedimentos entre otros, teniendo más peso dentro del análisis de vulnerabilidad aquellas rocas y/o sedimentos de textura granular gruesa, menos consolidados y de poca matriz, a través de los cuales algún tipo de contingencia en la dispersión de contaminantes pueda fluir con mayor facilidad.

Además de los registros de pozo y perfiles estratigráficos (Estado mecánico de los pozos) la información base obtenida en el Servicio Geológico Colombiano – INGEOMINAS fue utilizada para definir el tipo de sustrato obtenido para cada tipo acuífero. Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 1.

Parámetro D (Distancia al agua). Este parámetro corresponde a la distancia a la cual se encuentra el nivel freático del acuífero, y para acuíferos contaminados la distancia del techo del acuífero. En la Tabla 1 se muestra el resumen del valor GOD calculado para cada una de las unidades hidrogeológicas.

La formación geológica Areniscas del Limbo (Pgarl) y Arcillas del Limbo (pgal) no afloran, esto significa que no aparecen en el mapa (modelo 3D) de Vulnerabilidad Intrínseca ya que no cumplen con los objetivos de la metodología GOD.

De acuerdo al tipo de litología presente en la zona montañosa y de piedemonte los niveles del agua subterránea pueden variar, esto es válido ya que en la información recopilada del inventario hidrogeológico existen pozos al Nor-oeste del área de estudio que capturan el agua del acuífero Formación Areniscas del Limbo (Pgarl), y presentan el nivel freático entre los 20 – 50 m de profundidad.

Una vez definidos los parámetros de entrada se procedió a aplicar la formula definida en la metodología GOD (Ec.1).

Tabla 1. Resultados parámetro G, parámetro O, parámetro D y tipo de Vulnerabilidad (GOD).

Unidades hidrogeológicas	GOD - Tipo de Acuífero (G)	GOD - Tipo de Sustrato (O)	GOD - N.F (m) (D)	GOD – Versión 2009	Vulnerabilidad del Acuífero
Acuífero Cuaternario Depósitos Aluviales (AcQal)	1	0.5	0.9	0.45	Moderada
Acuífero Cuaternario Depósitos de Terraza (AcQt)	0.5	0.7	0.8	0.28	Baja
Acuífero Formación Corneta (AcTQlc)	0.5	0.7	0.9	0.31	Moderada
Acuífero Formación Chipaque (AcKsc)	0.2	0.5	0.4	0.04	Muy Baja
Acuífero Formación Une (AcKiu)	0.3	0.7	0.7	0.14	Baja
Acuífero Formación Fomeque (AcKif)	0.2	0.6	0.5	0.06	Muy Baja
Acuífero Formación Lutitas de Macanal (AcKilm)	0.2	0.7	0.4	0.05	Muy Baja
Acuífero Formación Depósitos de Derrubio (AcQd)	0.5	0.8	0.8	0.32	Moderada
Acuífero Formación Brechas de Buenavista (AcJsb)	0.5	0.7	0.7	0.24	Baja
Acuífero Formación Capas rojas del Guatiquía (AcPcgc)	0.3	0.6	0.8	0.14	Baja
Acuífero Formación Pipiral (AcPdp)	0.2	0.6	0.4	0.04	Muy Baja
Acuífero Formación Areniscas de Caqueza (AcKic)	0.3	0.7	0.7	0.14	Baja
Acuífero Filitas y cuarcitas de Guayabetal (AcPEqgu)	0.2	0.6	0.5	0.06	Muy Baja
Acuífero Palmichal (AcKpgp)	0.5	0.7	0.8	0.28	Baja

Fuente: Grupo de trabajo UMNG 2013.

Teniendo en cuenta los resultados del modelo Versión 2009, la vulnerabilidad varía de MODERADA a BAJA para los acuíferos Cuaternarios; para los acuíferos ubicados

en la zona montañosa y de piedemonte la vulnerabilidad es principalmente MUY BAJA, demostrando que el acuífero Cuaternario de depósitos aluviales (AcQal) y el acuífero Formación Corneta (AcTQlc) son los acuíferos que deben tener mayor atención por parte de la comunidad y las autoridades ambientales en la planeación, determinación de usos del suelo., etc.

En la figura 7, se observa el modelo 2.5 D el cual es la intersección entre la dirección de las líneas de flujo obtenidas a partir del modelo matemático, el inventario de aguas subterráneas, el modelo topográfico, y el resultado de la Vulnerabilidad intrínseca para la Versión 2009.

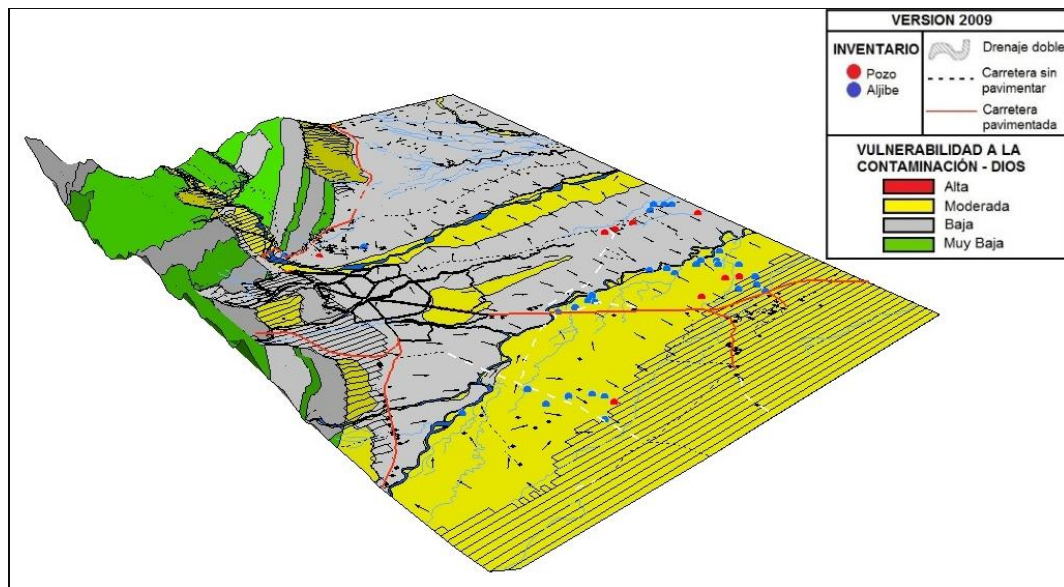


Figura 7. Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación. Versión 2009.

Fuente: Fuente propia.

Cálculo de vulnerabilidad Intrínseca para la Versión 2010.

Para el cálculo de la Vulnerabilidad intrínseca Versión 2010 se realizó el mismo proceso que para la Versión 2009, pero hay que recordar que se presumieron los valores de recarga aumentando a 2000 mm/año, lo cual indica un cambio en el parámetro distancia del agua (D) ya que el nivel freático aumenta. Los datos de Sustrato (S) y Ocurrencia (O) son iguales, ya que a través del tiempo no varían.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que en la Versión 2010 la vulnerabilidad varía de MODERADA a ALTA para los acuíferos Sedimentarios (Cuaternarios) ubicados en la zona plana; y para los acuíferos ubicados en la zona montañosa y de piedemonte la Vulnerabilidad presenta las mismas características que los valores de la Versión 2009.

En la figura 8 se observa el modelo versión 2010 con la dirección del flujo, topografía, inventario hidrogeológico y Vulnerabilidad Intrínseca, indicando que al sur del modelo las zonas secas disminuyen ya que el valor de recarga aumenta considerablemente.

Debido a que aumenta el nivel freático, la Versión 2009 en comparación con la versión 2010 cambia, generando valores de Vulnerabilidad Intrínseca más altos comprendidos entre MODERADOS y ALTOS para las rocas Sedimentarias (Cuaternarios), estableciendo para un posterior análisis en el ordenamiento del territorio que eviten algún tipo de contaminación que afecten a los acuíferos con una vulnerabilidad ALTA.

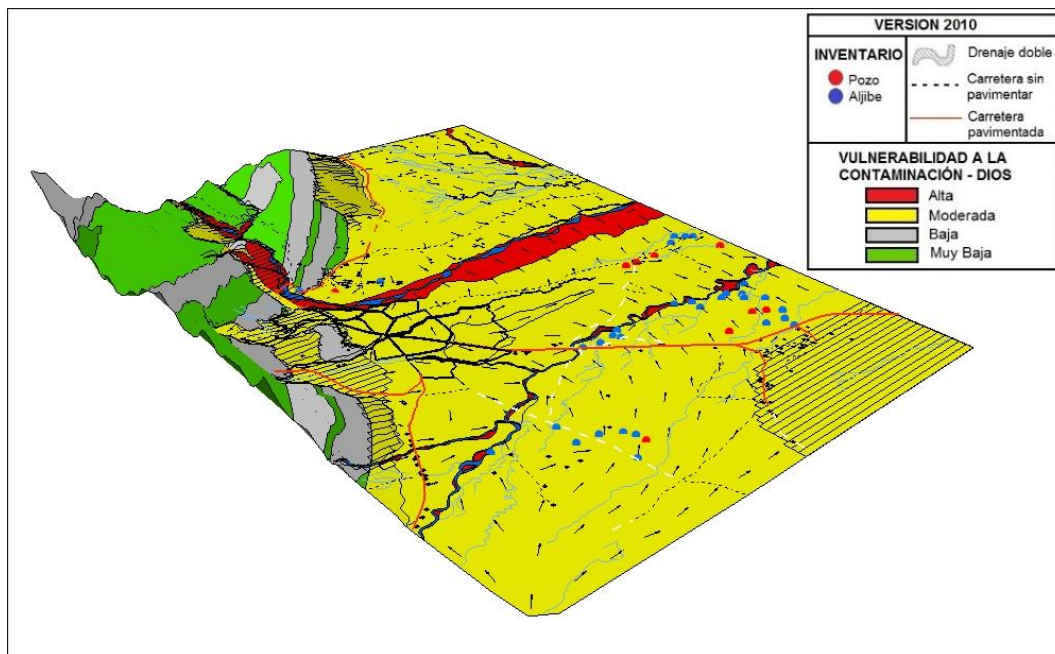


Figura 8. Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación. Versión 2010.

Fuente: Fuente propia.

A continuación en el modelo 3D se puede analizar la unión de cada una de las variables calculadas en los anteriores procesos, observando como resultado un modelo de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación para el año 2010, elementos editados como las líneas de Flujo tanto subsuperficiales como subterráneas y las capas geológicas construidas para el modelo.

2. RESULTADOS MODELO 3D.

La unificación de los anteriores modelos ejecutados en una interfaz 3D, permite obtener un mayor realismo en el momento de realizar el análisis de cada una de las etapas de un proyecto, teniendo más elementos de juicio en el momento de realizar análisis y toma de decisiones. En este caso para cada versión hay un mapa de superficies el cual presenta una localización de las coordenadas X, Y para un solo valor de Z, al adicionar elementos como los estratos geológicos y las direcciones de flujo la superficie funcional de dimensión 2.5, se convierte en una superficie de modelo solida de dimensión 3.

En el modelo 3D ejecutado se pueden observar de forma simultánea por varios usuarios como se transforma la Vulnerabilidad de los acuíferos de acuerdo a cambios en la recarga, la cual influye en el nivel freático y las direcciones de flujo del agua subterránea en interacción con la red de drenaje principal y su movimiento a través de las diferentes fallas y estratos geológicos. También se pueden realizar varias copias o versiones de más años con el fin de obtener históricos del comportamiento de la Vulnerabilidad en el municipio de Villavicencio a través del tiempo, aproximando cada vez más a la realidad el modelo matemático Hidrogeológico auxiliado por las herramientas GIS.

A continuación para la Versión 2010 se observa el resultado del modelo dimensión 3 (3D) para diferentes tipos de vistas en ArcSece.

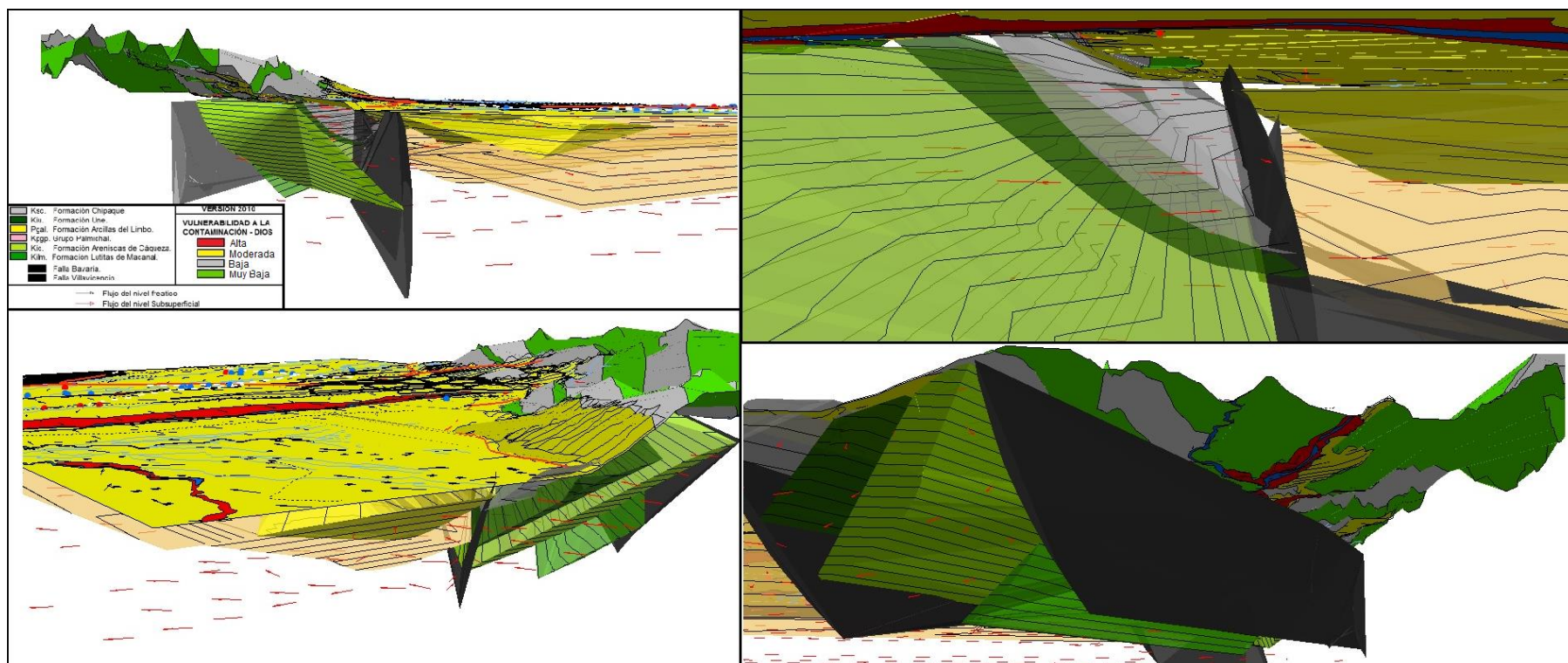


Figura 9. Modelo 3D versión 2010.

Fuente: Fuente propia.

3. CONCLUSIONES

La presente metodología origina un sistema adecuado en Data Server SQLEXPRESS.gds para utilizar las bases de datos relacionales (ArcSDE) empleadas para elaborar tareas específicas como las de Versionamiento sobre los elementos geográficos, permitiendo modificar y cambiar factores en diferentes áreas por uno o varios usuarios al mismo tiempo.

Usando una base de datos multiusuarios la herramienta “Versioning” puede ser aplicada en el área de hidrogeología con el fin calcular la Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación en el municipio de Villavicencio para un área de 30.000 Ha; este conjunto de herramientas ayudan a las autoridades de carácter ambiental (CORMACARENA) en la toma de decisiones sobre la planeación (POT), determinación de usos del suelo y distribución de las concesiones para la explotación del recurso hídrico subterráneo dependiendo del comportamiento de niveles freáticos medidos en campo.

Al ensamblar cada uno de los modelos creados (Vulnerabilidad, Flujo del agua subterránea y Geología) de dimensión 2D, 2.5D y 3D el resultado final es el esperado ya que se puede observar de forma simultánea por varios usuarios el cambio Vulnerabilidad, las direcciones de flujo a través de las capas geológicas y el comportamiento de los acuíferos de acuerdo al tipo de recarga en la Versión 2009 y Versión 2010.

Elementos como la cartografía base, el DEM y la geología entre otros, son mecanismos que pueden ser geoprocesados y consolidados en una base de datos geoespacial con el fin de analizar de forma detallada los resultados y poder duplicar ya sea por uno o varios usuarios un modelo tridimensional ya georreferenciado y agradable al usuario final.

El uso de los sistemas de información geográfica en conjunto con los sistemas de modelación numérica de las aguas subterráneas, han permitido un estado del conocimiento el cual posibilita la utilización habitual de los SIG en la manipulación de los datos de entrada al modelo de flujo y en la interpretación y visualización de las salidas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería Dirección de Posgrados; (2008). Taller Avanzado de Geotecnología, Versionamiento, Bogotá.
- [2] Soporte extensiones de ArcGis. En: www.support.esri.com/es (Octubre 2 del 2012).
- [3] CORMACARENA, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Sede Seccional Sogamoso, Escuela de Ingeniería Geológica. Grupo de Investigación Ingeniería Geológica UPTC; (2009). Evaluación Hidrogeológica del Municipio de Villavicencio, Villavicencio.
- [4] INGEOMINAS; (2001). Memoria Explicativa Geología de la plancha 266 Villavicencio Escala 1:100.000. Bogotá.
- [5] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; (2010). Propuesta Metodológica para Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos a la Contaminación, Bogotá, Contrato No. 1021.
- [6] Stephen Foster; Ricardo Hirata; Daniel Gomes; Mónica Délia; Marta Paris; (2003). Protección de la Calidad del Agua Subterránea, Banco Mundial.
- [7] INGEOMINAS; (2003), Leyenda de Vulnerabilidad.
- [8] Betancur Teresita; (2010), Hidrogeología para la gestión del recurso hídrico, Medellín, Copyringht @ Universidad de Antioquia.